

Підвищення ефективності розрахунку параметрів короткого замикання трифазних трансформаторів засобами польового моделювання

Д. С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш, М. І. Коцур, Т. Є. Дівчук

Проведено теоретичні дослідження електромагнітних процесів при випробуваннях силових трансформаторів в режимі дослідного короткого замикання на основі чисельної реалізації тривимірної моделі магнітного поля у частотному формулюванні. Шляхом верифікації даних розрахунків частотних і змінних у часі моделей магнітного поля обґрунтовано достовірність і точність визначення параметрів дослідного короткого замикання силового трансформатора у частотному формулюванні. Визначено основні закономірності розподілу магнітного поля в об'ємі активної частини трансформатора. В зонах локалізації магнітного поля 3D розподіл напруженості є рівномірним і визначається 2D розподілом у горизонтальному перерізі активної частини на середині висоти фазних обмоток. Значення освової компоненти напруженості магнітного поля наближаються до 96–97 % від модуля вектора напруженості. Реалізовано ефективний підхід до польового моделювання на основі декомпозиції розрахункової області на просторові зони. Кожній розрахунковій зоні поставлено у відповідність електричний контур схеми заміщення. Розподіл електричних потенціалів у горизонтальних перерізах провідників між котушками або між витками обмоток прийнято рівномірним. Суперпозицію магнітних полів у просторових зонах здійснено засобами динамічного синтезу за критеріями мінімальної струмової похибки для електричних контурів схеми заміщення. Декомпозиція 3D області польового моделювання на центральну і торцеві зони здійснюється на відстані 10–15 % висоти фазних обмоток, що забезпечує високу точність розрахунку напруженості магнітного поля із похибкою не більше 1,62 %. Витрати часу для польового моделювання електромагнітних процесів у режимі дослідного короткого замикання зменшено у 5 раз, а вимоги до потужності обчислювальних апаратних ресурсів знижено у 4 рази. Високу точність ідентифікації параметрів дослідного короткого замикання трифазних трансформаторів підтверджено порівнянням даних розрахунків із результатами випробувань в умовах приватного підприємства «Елтіз» (Запоріжжя, Україна). Похибки розрахунків не перевищують 1,42 % для активних втрат і 1,39 % для напруги короткого замикання. Запропонований підхід із використанням методів декомпозиції та динамічного синтезу дозволяє значно підвищити ефективність попереднього етапу конструкторської підготовки виробництва і може бути використаний при реалізації задач оптимізації конструктивних рішень

Ключові слова: електромагнітне поле, трифазний трансформатор, дослідне коротке замикання, декомпозиція, динамічний синтез

1. Вступ

Силові трансформатори є одними з найбільш поширених електротехнічних виробів, що відіграють основну роль у транспортуванні електричної енергії від місця її виробництва до користувачів. Установлена потужність силових трансформаторів може на порядок перевищувати потужність генерації електричної енергії, кратність трансформації якої може дорівнювати 7–8 [1, 2]. Тому ставляться високі вимоги до техніко-економічних показників та надійності силових трансформаторів, що мають забезпечуватися вже на етапі конструкторської підготовки виробництва [3].

У сталих режимах роботи енергосистем і розподільчих мереж основний вплив від трансформаторного обладнання визначається параметрами схеми замикання для дослідного короткого замикання (КЗ) [3–5]. Опори КЗ розраховують за паспортними даними трансформатора для напруги і втрат короткого замикання [1, 2].

Інженерні методики проектування, що базуються на методах дослідження лінійних систем, фрагментарно враховують особливості конструкції активної частини силового трансформатора та інших його конструктивних елементів [1, 2]. Це може призводити до викривлення реальних процесів електромагнітного перетворення енергії змінного струму у силових трансформаторах [4, 5]. Тому точність проектних розрахунків паспортних даних короткого замикання трансформатора є невисокою, а допустимі похибки можуть наближатися до 10–15 % [3]. Це обумовлює актуальність розробки високоточних і вискоефективних методик розрахунку параметрів трансформатора у режимі дослідного КЗ.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для визначення параметрів і характеристик силових трансформаторів, як правило, застосовуються схемні моделі, що базуються на теорії електричних та магнітних кіл [6, 7]. Порівняна простота алгоритмів комп'ютерної реалізації обумовила використання схемних моделей в інженерних розрахунках на етапі конструкторської підготовки виробництва [4, 5]. Проте цілий ряд припущень і спрощень, що покладені в основу схемних моделей, призводять до відхилення від реальних електромагнітних процесів перетворення енергії змінного струму під час її трансформування [8, 9]. Спрощені описи поверхневих ефектів, нелінійних властивостей активних і конструкційних матеріалів [10], нехтування особливостями багатокомпонентної просторової конструкції активної частини трансформаторів [11] можуть призводити до суттєвих похибок розрахунку [12–14]. Це накладає обмеження на застосування зазначених методик для розрахунку струмів, напруги і електричних опорів у динамічних режимах короткого замикання з ударними електродинамічними зусиллями та термічними навантаженнями [15, 16].

Більш повне врахування впливу конструктивних факторів на параметри короткого замикання силових трансформаторів можна забезпечити використанням польового моделювання [17–19]. Тривимірне польове моделювання може забезпечити високу точність при визначенні параметрів силових трансформаторів. Проте його комп'ютерна реалізація на основі методів кінцевих елементів

тів у багатокомпонентних областях активної частини з нелінійними електрофізичними властивостями ускладнена великими витратами часу і вимогами до обчислювальних ресурсів [17]. В [20, 21] запропоновано тривимірну модель електромагнітних процесів для визначення електричних та електроенергетичних параметрів електротехнічних систем трансформування змінного струму. Однак її застосування обмежено тільки для систем, що мають лінійні магнітні властивості матеріалів. В [22–24] для ефективності чисельної реалізації польових моделей пропонується застосовувати диференціацію розмірів кінцевих елементів та апроксимації поліномами Лагранжу першого порядку. Застосування такого підходу до силових трансформаторів ускладнюється значною нелінійністю магнітних властивостей та різницею геометричних розмірів окремих елементів [25–27]. Деякі автори намагаються вносити спрощення у геометричну модель [28, 29], нехтувати нелінійністю магнітних властивостей матеріалів [24] або застосовувати двовимірні моделі [30, 31]. Зазначені припущення та спрощення знижують точність результатів моделювання і в окремих випадках можуть спотворити реальну картину електромагнітних процесів. Польова розрахункова модель силового трансформатора в режимі дослідного короткого замикання повинна детально відображати багатокомпонентну будову активної частини та враховувати нелінійність електрофізичних і магнітних властивостей активних матеріалів. Ефективність чисельної реалізації польової моделі повинна відповідати вимогам задач оптимізації конструктивних параметрів. Це обумовлює необхідність розробки спеціальних підходів, що покращують точність і ефективність обчислень та забезпечують адаптацію тривимірного польового моделювання до задач оптимального проектування силових трансформаторів.

3. Мета роботи

Метою роботи є розробка ефективного підходу до польового моделювання електромагнітних процесів трифазного трансформатора шляхом декомпозиції 3D області активної частини на підобласті для синтезу параметрів відповідних електричних кіл у параметри КЗ із високою точністю.

Для реалізації поставленої мети вирішуються наступні задачі:

- визначити математичні формулювання польової моделі змінного струму, що відображає особливості електромагнітного перетворення енергії у режимі дослідного КЗ силового трансформатора із багатокомпонентною активною частиною складної конструкції;

- визначити параметри декомпозиції розрахункової області активної частини трансформатора на просторові зони зменшеного об'єму для скорочення кількості кінцевих елементів, забезпечення точності і ефективності процесів обчислення;

- розробити метод синтезу польових зон у електричне коло по критерію мінімізації струмових похибок для уточненого визначення параметрів КЗ.

4. Формулювання математичної моделі електромагнітних процесів у трансформаторі для режиму дослідного короткого замикання

До 3D області польового моделювання електромагнітних процесів в силовому трансформаторі входить активна частина, яку розміщено у баку – 6 (рис. 1, *а*). Активна частина складається із систем обмоток, магнітної системи, систем поздовжньої і головної електроізоляції. До системи обмоток входять основні та регулювальні обмотки на стороні високої напруги (ВН) – 1 і обмотки на стороні низької напруги (НН) – 2 із котушками, витками, шарами тощо [33]. У шихтованій магнітній системі трансформатора – 3 виділяють стрижні та ярма, що стягнуті ярмовими балками. До системи електроізоляції трансформатора входить тверда ізоляція з електрокартону – 4, паперова електроізоляція і трансформаторне масло – 5 (рис. 1, *а*).

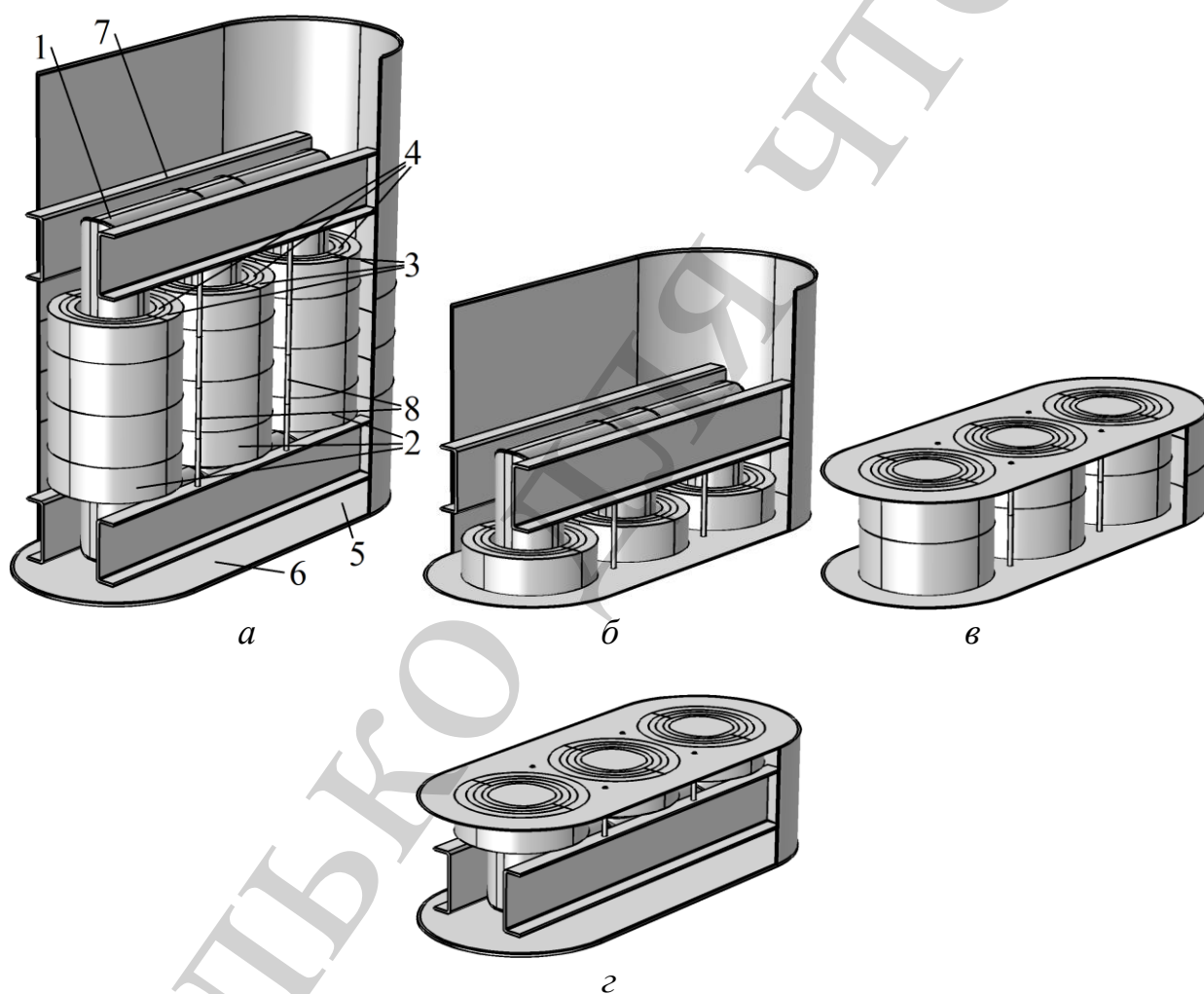


Рис. 1. Трифазний силовий трансформатор: *а* – розрахункова область; *б*, *в*, *г* – верхня, центральна і нижня зони декомпозиції

За даними [17] електрофізичні процеси у діелектричних матеріалах можна вважати подібними до процесів електропровідності у матеріалах з відносно малою електропровідністю. Тому електромагнітні поля в розрахунковій області Ω

(рис. 1, а) можна описати рівняннями Максвелла у частотних формулюваннях [20, 21]:

$$\begin{cases} \nabla \times \left[(\mu_0 \mu_j)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j \right] = -\sigma_j(\theta_j) (j\omega \mathbf{A}_j + \nabla V_j); \\ \nabla \cdot [\sigma_j(\theta_j) \cdot \nabla \cdot V_j] = -j\omega \cdot \nabla \cdot (\sigma_j(\theta_j) \cdot \mathbf{A}_j), \end{cases} \quad (1)$$

з умовами потенціальності [20]:

$$\{\mathbf{E}_j = -\mathbf{grad}(V); \mathbf{B}_j = \mathbf{rot}(\mathbf{A}_j), \quad (2)$$

співвідношеннями виду [20]:

$$\{\dot{\mathbf{H}}_j = [\mu_0 \mu_j (|\dot{\mathbf{B}}_j|)]^{-1} \dot{\mathbf{B}}_j; \dot{\mathbf{J}}_j = \sigma_j(\theta_j) \dot{\mathbf{E}}_j + \dot{\mathbf{J}}_{e_j}, \quad (3)$$

де \mathbf{A} , V – векторний магнітний і електричний потенціали, \mathbf{B} – індукція магнітного поля, \mathbf{E} , \mathbf{H} – напруженості електричного і магнітного полів, \mathbf{J} – щільність струму, $\sigma(\theta)$ – температурна залежність питомої електричної провідності, θ – температура, μ_0 – магнітна проникність вакууму, $\mu(|\mathbf{B}|)$ – еквівалентна відносна магнітна проникність, ω – кутова частота.

Система польових рівнянь (1) доповнюється умовами сполучення магнітних і електричних полів на границях осередків із різними електрофізичними властивостями [21]:

$$\{\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_+ - \mathbf{H}_-) = 0; \mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_+ - \mathbf{J}_-) = 0, \quad (4)$$

та однорідними граничними умовами на зовнішній поверхні баку [26] або імпедансними умовами [32] на його внутрішній поверхні.

Для розрахункової області Ω температурний режим силового трансформатора приймається стаціонарним. Температури елементів активної частини визначаються за проектом або за допустимими для класу нагрівостійкості А даними [1]. Врахування анізотропії магнітних властивостей холоднокатаної електротехнічної сталі виконувалось відповідно до [25].

Для елементів силового трансформатора у 3D області Ω розраховуються щільності струмів, активні втрати (для електропровідних матеріалів) та енергія магнітного поля [20]:

$$\begin{cases} W|_j = \frac{1}{4} \iiint_{V_j} (\dot{\mathbf{H}}_j, \dot{\mathbf{B}}_j^*) / \mu_0 \mu_j (|\dot{\mathbf{B}}_j|) dx dy dz; \\ P|_j = \iiint_{V_j} \sigma_j^{-1} (\dot{\mathbf{J}}_j, \dot{\mathbf{J}}_j^*) \cdot dx dy dz; \\ \mathbf{J}_j = -\sigma_j \cdot (\mathbf{grad}(V_j) + j\omega \mathbf{A}_j), \end{cases} \quad (5)$$

а також струми у фазних обмотках ВН і НН.

Фазні обмотки високої напруги приєднують до трифазного джерела живлення за схемою Y, а обмотки низької напруги, що з'єднані за схемою Δ, зашунтовано гілками із невеличким активним опором. Обмеження для потужності джерела випробувальної напруги враховують за допомогою лінійних опорів між цим джерелом і обмотками трансформатора. Це не буде призводити до скільки-небудь помітного збільшення струмової похибки за умови, що зазначені опори є на декілька порядків меншими опорів КЗ, визначених за паспортними даними. У режимі дослідного КЗ фазні струми в обмотках дорівнюють номінальним значенням у відповідності до фазної напруги КЗ на стороні ВН $\{\Delta \dot{U}_k\}$, $k = 1, 2, 3$:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_k = -j\omega \dot{\Psi}_k + \dot{I}_k \cdot R_k, & k = 1, 2, 3; \\ 0 = -j\omega \dot{\Psi}_k + \dot{I}_k \cdot R_k, & k = 4, 5, 6. \end{cases} \quad (6)$$

Комп'ютерна реалізація польової моделі (1)–(4) здійснюється у структурі засобів спеціалізованого програмного забезпечення польового моделювання COMSOL Multiphysics [33]. 3D область розбивається на тривимірні кінцеві елементи – тетраедри з ребрами, що апроксимуються поліномами Лагранжу другого порядку. Для підвищення ефективності чисельної реалізації моделі виконується диференціація розмірів кінцевих елементів. В підобластях з яскраво вираженою нелінійністю магнітних властивостей і локалізацію магнітного поля розміри кінцевих елементів зменшуються та збільшується біля зовнішньої границі розрахункової області.

5. Результати дослідження магнітних полів трансформатора у режимі дослідного короткого замикання. Формулювання критерії декомпозиції активної частини та синтезу електричних кіл польових зон

Польове моделювання електромагнітних полів в області активної частини здійснювалося для трифазного силового трансформатору класу напруги 35 кВ і потужністю 1600 кВА. Обмотки з'єднані за схемою Y/Y₀–0. Номінальні значення лінійних напруг на стороні ВН та НН складали 20 кВ і 0.4 кВ. Для режиму дослідного КЗ амплітуди фазних напруг визначались за паспортним значенням напруги КЗ, що складала 6.5 % від номінальної фазної напруги зі сторони ВН трансформатора. Застосовувалась симетрична трифазна система еле-

ктричних напруг із вектором фазних зсувів $[0; 2\pi/3; 4\pi/3]$ для частоти 50 Гц змінного струму.

Результати 3D моделювання представлені розподілами напруженості магнітного поля та її осьової компоненти у вертикальних і горизонтальних перерізах активної частини силового трансформатора (рис. 2, *а*).

За даними польових розрахунків встановлено, що для режиму дослідного КЗ локалізація магнітного поля відбувається у системах фазних обмоток. У визначених зонах локалізації напрями і модуль векторів напруженості магнітного поля майже не змінюються. Найбільшою компонентною є проекція H_z , значення якої складає 96–97 % від модуля вектору магнітної напруженості. Це дозволяє вважати, що 3D розподіл напруженості магнітного поля в зоні його локалізації визначається 2D розподілом у горизонтальній площині перетину активної частини. Зміною електричних потенціалів по поверхні горизонтальних перерізів провідників між котушками або між витками обмоток можна знехтувати і прийняти припущення рівномірного розподілу електричних потенціалів.

Визначені особливості розподілу магнітного поля дозволяють застосувати для розрахункової області Ω принцип суперпозиції електромагнітних полів, розрахованих окремо у центральній (рис. 1, *в*) і торцевих зонах (рис. 1, *б*, *г*). Просим уточнити какие обозначения являются правильными

Для зменшення кількості кінцевих елементів і розмірності рівнянь кінцево-елементної моделі доцільно застосувати розподіл структури активної частини на підсистеми із окремими діючими елементи або складовими [33]. Це дозволить суттєво скоротити кількість функціональних зв'язків між параметрами кожної підсистеми і кількість незалежно варійованих параметрів для мінімізації струмових похибок для фазних струмів дослідного КЗ.

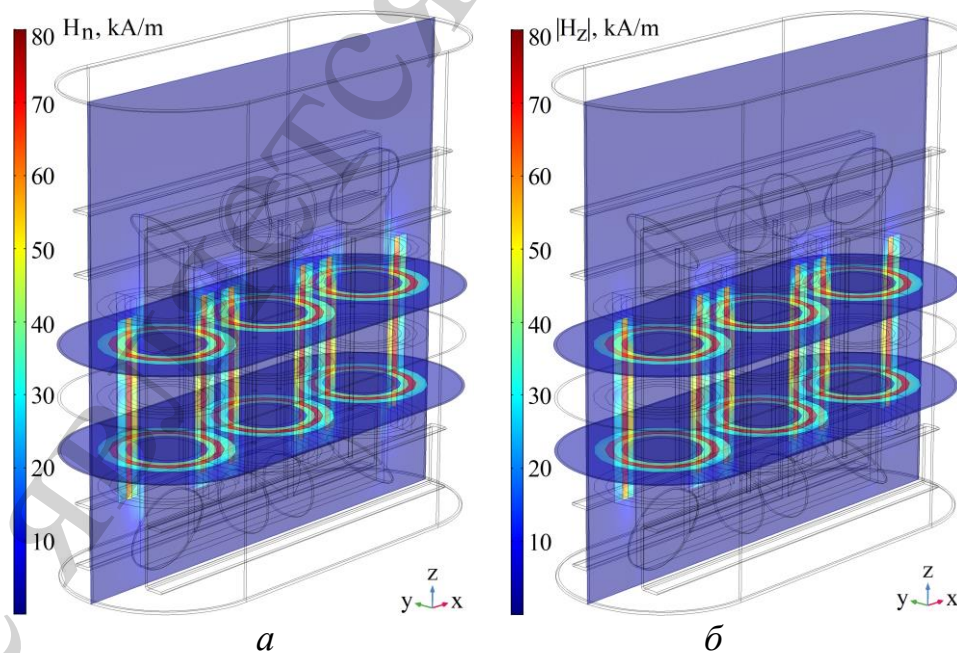


Рис. 2. Магнітне поле активної частини силового трансформатора: *а* – амплітуди напруженості магнітного поля; *б* – амплітуди проекції напруженості магнітного поля на вертикальну вісь трансформатора

Декомпозиція розрахункової області Ω полягає у поділі на декілька розрахункових зон, кожній з яких можна поставити у відповідність контури схеми заміщення. Зазначені зони відокремлені одна від одної горизонтальними перерізами, що перпендикулярні осі Oz і проходять через осьові ізоляційні канали між котушками або між витками обмоток. Відстань горизонтальних перерізів від верхнього і нижнього торців становить 10–15 % висоти обмоток.

Центральна зона включає центральні частини фазних обмоток ВН, НН і стрижнів, головну ізоляцію, трансформаторне масло і центральну частину баку (рис. 1, *в*). До торцевих зон входять верхня або нижня частини баку, верхні або нижні ярма, відповідні частини обмоток ВН, НН і стрижнів різних фаз, тверда ізоляція та трансформаторне масло (рис. 1, *б*, *з*). Поділ області моделювання Ω на зони забезпечує скорочення часу реалізації польових моделей завдяки меншій кількості кінцевих елементів у зонах меншого об'єму.

Об'єм області електромагнітного перетворення енергії Ω можна відобразити сумою об'ємів зон і визначити електричні втрати і магнітну енергію сумою значень у відповідних зонах.

Для синтезу електричних кіл на границях сполучення ділянок фазних обмоток у зонах приймаються умови рівності електричних потенціалів:

$$\left\{ V_{j,i} = V_{j,i+1} \Big|_{\Gamma_{j,i+1}} = \text{const}_{j,i}, \Delta U_{i,j} = V_{j,i} - V_{j,i+1} \Big|_{\Gamma_{j,i+1}}, \right. \quad (7)$$

для яких система рівнянь (6) прийме вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{BH,k} &= \sum_i \left\{ \Delta \dot{U}_{i,j} \right\}_k \Big|_{k=1,2,3}, 0 = \sum_i \left\{ \Delta \dot{U}_i \right\}_k \Big|_{k=4,5,6}, \\ \Delta \dot{U}_{k,i} &= -j\omega \dot{\Psi}_{k,i} + \dot{I}_{k,i} \cdot R_{k,i}, k \in (1,6), \end{aligned} \right. \quad (8)$$

де $\left\{ \Delta \dot{U}_{k,i} \right\}$ – падіння напруги у ділянках фазних обмоток; i – кількість послідовних гілок у контурі фазної обмотки, індекси $k \in (1,2,3)$ належать обмоткам ВН фаз А, В, С, індекси $k \in (4,5,6)$ належать обмоткам НН фаз А, В, С, відповідно.

В умовах (7) кожне значення const є «вільним». Тому падіння напруги на ділянках фазних обмоток $\left\{ \Delta \dot{U}_{i,j} \right\}_{k \in (1,6)}$ не можуть бути задані заздалегідь і мають визначатися із рішення задачі мінімізації струмових похибок. Для синтезу електричних кіл і суперпозиції магнітних полів у розрахункових зонах активної частини можна сформулювати цільову функцію із компонентами, що визначаються сумою квадратів струмових похибок для струмів у ділянках обмоток:

$$\left\{ \min(M^2(\mathbf{D}, \mathbf{R})) = \sum_{k=1}^6 \min(M^2(\mathbf{D}, \mathbf{R})_k) = \sum_{k=1}^6 \min \left(\left(\sum_i \dot{\mathbf{I}}_{i,k} - \dot{\mathbf{I}}_k \right)_j^2 \right). \right. \quad (9)$$

У загальному випадку кожна компонента вектору цільової функції $M^2(\mathbf{D}, \mathbf{R})_k$ є функцією векторів незалежно варійованих \mathbf{D} і залежних \mathbf{R} параметрів для кожної обмотки трансформатора. Падіння напруги на ділянках контуру обмотки розглядаються як проекції вектору незалежно варійованих параметрів \mathbf{D} . Це дозволяє перетворити компоненти цільової функції $M^2(\mathbf{D}, \mathbf{R})_k$ у компоненти функції $\tilde{M}^2(\mathbf{D})_k$.

Для реалізації умов (9) доцільно застосувати метод динамічного програмування [34]. Вектор параметрів оптимізації з компонентами $\mathbf{D} = \{\Delta \dot{\mathbf{U}}_i\}_{i \in (1,3), k \in (1,6)}$ можна представити, як суму векторів початкового наближення $\mathbf{D}_0 = \{\Delta \dot{\mathbf{U}}_{0,i}\}_{k \in (1,6)}$ і його уточнення $\delta \mathbf{D} = \{\delta \Delta \dot{\mathbf{U}}_{1,i}\}_{k \in (1,6)}$. Тому умовам оптимальності (9) можна поставити у відповідність систему рекурентних рівнянь Беллмана [9] для кожної обмотки трансформатора:

$$\begin{cases} \min \Delta \tilde{M}_\Sigma^2 = \Phi(\mathbf{D}_{0,k}) = \\ = \min_{\delta \mathbf{D}_1} \dots \min_{\delta \mathbf{D}_m} \left[\left(\Delta \tilde{M}_1^2(\mathbf{D}_{0,k}, \delta \mathbf{D}_{1,k}) + \dots \Delta \tilde{M}_m^2(\mathbf{D}_{m-1,k}, \delta \mathbf{D}_{m,k}) \right) \right] \end{cases} \Bigg|_{k \in (1,6)} \quad (10)$$

Співвідношення (9), (10) визначають умови динамічного сполучення «вільних» параметрів у рівняннях (7) для центральних і торцевих зон 3D області Ω . Ітераційний обчислювальний процес методу динамічного програмування реалізується у заданих обмеженнях для струмових $\varepsilon_r \leq 0,1 \%$ і кутових похибок $\varepsilon_\varphi \leq 0,5 \%$.

Для режиму дослідного КЗ було застосовано умови, що суми миттєвих значень падіння напруги у контурах частин фазних обмоток кожної зони декомпозиції мають дорівнювати миттєвим значенням напруги КЗ для кожної фази. Просторовий розподіл напруженості магнітного поля у підобластях верхньої – I, центральної – II та нижньої – III зони декомпозиції порівнювався із розподілом напруженості у 3D області активної частини (рис. 3). Для методу декомпозиції найбільші відхилення розрахунків напруженості магнітного поля характерні для горизонтальних поверхонь зон, що перетинають обмотки (рис. 3). Проте максимальне значення не перевищувало 1.62 %.

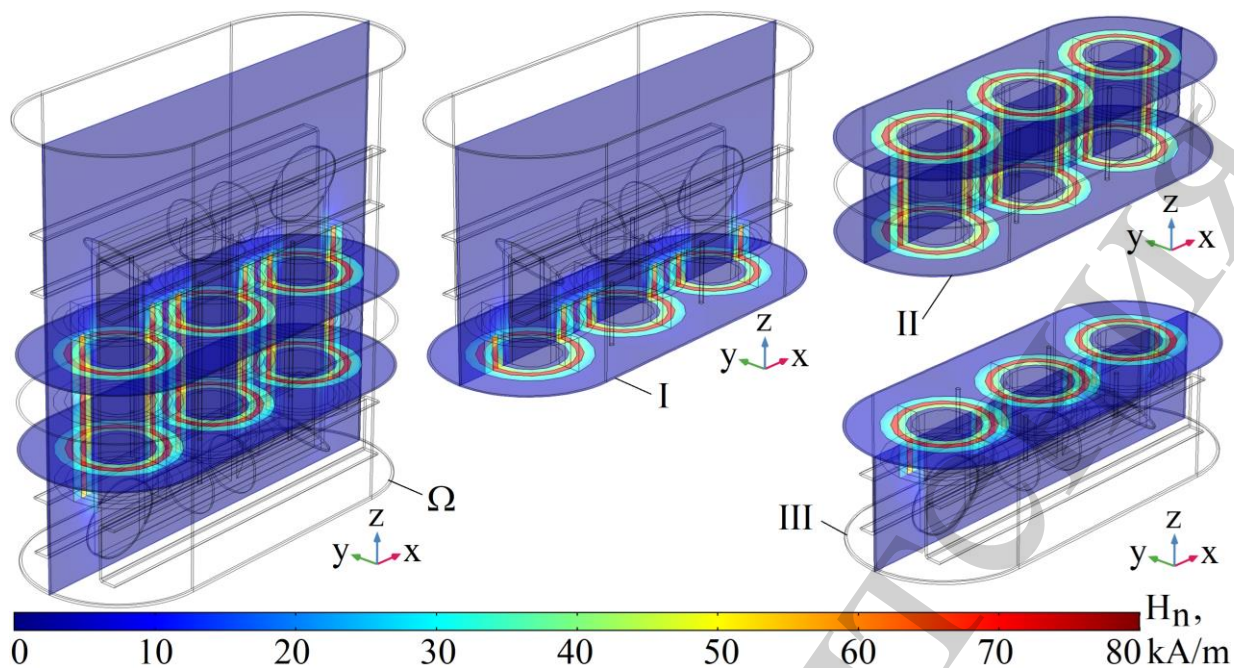


Рис. 3. Розподіл нормальної складової напруженості магнітного поля в розрахунковій області і зонах

6. Обговорення результатів моделювання електромагнітних процесів у режимі дослідного короткого замикання трифазного трансформатора

Верифікація параметрів КЗ за даними польового моделювання параметрів КЗ трансформатора здійснено для напруги КЗ, значення якої склало 740,2 В (6,41 %) для моделі у частотному формулюванні (frequency-domain) та 741,7 В (6,42 %) для моделі у часовому формулюванні (time-dependent). Відповідні розрахункові значення втрат КЗ дорівнюють 17,745 кВт і 17,815 кВт.

Таким чином, відносні нев'язки частотних розрахунків не перевищували 0,4 % для втрат і 0,2 % для напруги короткого замикання. Відносна похибка розрахунку втрат і напруги короткого замикання не перевищувала 1,5 %.

Похибки розрахунку втрат активної потужності, енергії магнітного поля і падінь напруги методом декомпозиції 3D області активної частини силового трансформатора наводяться в табл. 1. Відносні похибки в зонах декомпозиції не перевищують: 0,47 % – для енергії магнітного поля, 0,53 % – для електричних втрат, 0,51 % – для модуля падіння напруги, 0,29 % – для фази падіння напруги. Відносні похибки розрахунку параметрів КЗ складають 1,42 % – для втрат і 1,39 % – для напруги КЗ. Валідацію розрахункових параметрів короткого замикання здійснено шляхом порівняння розрахункових даних за методикою [26] з результатами випробувань, отриманих в умовах приватного підприємства «Елтіз» (Запоріжжя, Україна).

Достовірність і точність результатів моделювання з використанням методів декомпозиції і динамічного синтезу контурів ділянок обмоток забезпечується за умови, що розподіл електричних потенціалів на границях сполучення наближається до рівномірного. У такому випадку сума активних втрат і енергії

магнітного поля у розрахункових зонах буде з високою точністю відповідати активним втратам і магнітній енергії для 3D області активної частини.

Таблиця 1

Похибки методу динамічного синтезу польових моделей для критерію мінімальної струмової похибки

Розрахункові області (зони)	Верхня зона	Центральна зона	Нижня зона	Область активної частини
Енергія магнітного поля	0,47 %	0,19 %	0,25 %	0,76 %
Втрати активної потужності	0,53 %	0,31 %	0,48 %	1,42 %
Падіння напруги (модуль/фаза)	0,51 %/0,29 %	0,38 %/0,18 %/	0,46 %/0,28 %	1,39 %/0,78 %

Запропонована комбінація методів декомпозиції і динамічного синтезу з «вільними» умовами сполучення електричних кіл ділянок фазних обмоток забезпечує ефективну реалізацію 3D моделювання магнітних полів в областях складної просторової форми. Завдяки урахуванню кінцевих розмірів магнітної системи, системи обмоток і особливостей взаємного розташування досягається висока достовірність і точність даних моделювання і визначення параметрів КЗ. Також у 5 разів зменшуються витрати часу і у 4 рази знижуються вимоги до потужності обчислювальних ресурсів для уточненого розрахунку параметрів КЗ.

Область застосування результатів проведених досліджень обмежена найбільш поширеними типами трифазних силових трансформаторів класів напруги до 35 кВ включно із схемами з'єднання обмоток Y/Y_0-0 , $Y/D-11$, D/Y_0-11 [1]. Для трансформаторів класу напруги 110 кВ та вище застосовують лінійний увід у середину обмоток ВН, що виконуються за електричною схемою із двома паралельними гілками [1]. Крім того, високі класи напруги потребують істотного збільшення розмірів осевих ізоляційних проміжків у середині обмоток ВН, що призводить до збільшення у рази кількості зон декомпозиції для розрахунку параметрів КЗ трансформатору. Тому потребують подальшої розробки ефективні підходи до високоточного визначення параметрів КЗ для трансформаторів з класом напруги 110 кВ і вище.

У подальшому запропоновані методи декомпозиції і динамічного синтезу можуть бути адаптовані для дослідження високовольтичних реакторів і обертових електричних машин та визначення їх параметрів у випробувальних режимах.

7. Висновки

1. Встановлено, що математичні формулювання для моделі магнітного поля відображають особливості електромагнітного перетворення енергії у режимі дослідного КЗ силового трансформатора із багатокомпонентною активною частиною складної конструкції. Шляхом верифікації даних розрахунків частотних і

змінних у часі моделей магнітного поля обґрунтовано достовірність і точність результатів при використанні частотних формулювань для визначення параметрів дослідного КЗ силового трансформатора. Відносні нев'язки частотних розрахунків не перевищували 0,4 % для втрат і 0,2 % для напруги короткого замикання. Порівняння даних розрахунків з результатами випробувань в умовах приватного підприємства «Елтіз» (Запоріжжя, Україна) підтверджує висока точність ідентифікації параметрів дослідного КЗ. Відносна похибка розрахунку втрат і напруги короткого замикання не перевищує 1,5 %.

2. Встановлено, що при дослідному КЗ локалізація магнітного поля відбувається у фазних обмотках. У зонах локалізації напрямки і модуль векторів напруженості магнітного поля майже не змінюються. Найбільшою є осьова компонентна, значення якої складає 96–97 % від модуля вектору магнітної напруженості. Це дозволяє визначити 3D розподіл напруженості магнітного поля в зоні локалізації за даними 2D розподілу у горизонтальній площині перетину активної частини на середині висоти фазних обмоток. Зміною електричних потенціалів по поверхні горизонтальних перерізів провідників між котушками або між витками обмоток можна знехтувати і прийняти припущення рівномірного розподілу. Розрахункову область поділено на центральну і торцеві зони. Кожній із зон поставлено у відповідність електричний контур у схемі заміщення. Декомпозиція 3D області польового моделювання на зони на відстані 10...15 % висоти фазних обмоток від їх торців забезпечує високу точність розрахунку просторового розподілу напруженості магнітного поля із похибкою не більше 1,62 %.

3. Встановлено, що динамічний синтез польових зон з електричними колами у схемі заміщення за критерієм мінімальної струмової похибки суттєво підвищує обчислювальну ефективність визначення параметрів КЗ. У заданих обмеженнях для струмових $\varepsilon_r \leq 0,1$ % і кутових похибок $\varepsilon_\phi \leq 0,5$ % відносні похибки розрахунків не перевищують 1,42 % для активних втрат і 1,39 % для напруги КЗ. Застосування методів декомпозиції і динамічного синтезу електричних кіл дозволяє у 5 разів зменшити витрати часу і у 4 рази знизити вимоги до обчислювальних ресурсів.

Література

1. Бики М. А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчет основных параметров. М.: Знак, 2013. 612 с.
2. Kharade S., Kulkarni S. Transformer Engineering: Design and Practice. CRC Press, 2004. 496 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9780203970591>
3. C57.12.90-2006 – IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. doi: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2006.320496>
4. Лулье А. И. Процесс включения силового трансформатора на холостой ход и короткое замыкание // Электротехника. 2008. № 2. С. 2–18.
5. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981. 365 с.

6. Новаш В. И., Румянцев Ю. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки matlab-simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12–24.

7. Schiop A., Popescu V. Pspice simulation of power electronics circuit and induction motor drives // Revue Roumaine des Sciences Techniques–Serie Electrotechnique et Energetique. 2007. Vol. 52, Issue 1. P. 33–42.

8. Speed synchronization methods of the energy-efficient electric drive system for induction motors / Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Bezverkhnia Y., Andrienko D. // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336208>

9. Jamali M., Mirzaie M., Asghar-Gholamian S. Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions // Electronics and Electrical Engineering. 2011. Vol. 109, Issue 3. doi: <https://doi.org/10.5755/j01.eee.109.3.162>

10. Singh A. K., Patel S. Mitigation of Inrush Current For Single Phase Transformer by Control Switching Method // International Journal of Electronics, Electrical and Computational System. 2015. Vol. 4. P. 146–150.

11. Taghikhani M. A., Sheikholeslami A., Taghikhani Z. Harmonic Modeling of Inrush Current in Core Type Power Transformers Using Hartley Transform // IJEEE. 2015. Vol. 11, Issue 2. P. 174–183 doi: <https://doi.org/10.22068/IJEEE.11.2.174>

12. Chiesa N., Mork B. A., Høidalen H. K. Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010. Vol. 25, Issue 4. P. 2599–2608. doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2010.2045518>

13. Khederzadeh M. Mitigation of the impact of transformer inrush current on voltage sag by TCSC // Electric Power Systems Research. 2010. Vol. 80, Issue 9. P. 1049–1055. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.01.011>

14. Тиховод С. М. Моделирование переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения // Електротехніка та електроенергетика. 2014. № 2. С. 59–68. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2014-2-8>

15. Increasing of thermal reliability of a regulated induction motor in non-standard cycle time conditions / Kotsur M., Kotsur I., Bezverkhnia Y., Andrienko D. // 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248960>

16. Лазарев Н. С., Шульга Р. Н., Шульга А. Р. Токи включения силовых трансформаторов // Електротехніка. 2010. № 11. С. 11–17.

17. Подольцев А. Д., Конторович Л. Н. Численный расчет электрических токов, магнитного поля и электродинамических сил в силовом трансформаторе в аварийных режимах с использованием MATLAB/SIMULINK и COMSOL // Технічна електродинаміка. 2011. № 6. С. 3–10.

18. Majumder R., Ghosh S., Mukherjee R. Transient Analysis of Single Phase Transformer Using State Model // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016. Vol. 5, Issue 3. P. 3300–3306.
19. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method / Yarymbash D. S., Yarymbash S. T., Kotsur M. I., Litvinov D. O. // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2018. Issue 1. P. 65–74. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-8>
20. Yarymbash D. S., Oleinikov A. M. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads // *Russian Electrical Engineering*. 2015. Vol. 86, Issue 2. P. 86–92. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068371215020121>
21. Ярымбаш Д. С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока // *Научный вестник Национального горного университета*. 2015. № 3. С. 95–102.
22. A New Approach of the Induction Motor Parameters Determination in Short-Circuit Mode by 3D Electromagnetic Field Simulation / Kotsur M., Yarymbash D., Yarymbash S., Kotsur I. // *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017. P. 207–210. doi: <https://doi.org/10.1109/ysf.2017.8126620>
23. A New Simulation Approach of the Electromagnetic Fields in Electrical Machines / Yarymbash D., Kotsur M., Subbotin S., Oliinyk A. // *2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. 2017. P. 452–457. doi: <https://doi.org/10.1109/dt.2017.8024332>
24. Милых В. И., Полякова Н. В. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режимах холостого хода и короткого замыкания // *Электротехника та електроенергетика*. 2013. № 2. С. 5–13.
25. Features of Defining Three-Phase Transformer No-Load Parameters by 3D Modeling Methods / Yarymbash D., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T., Litvinov D. // *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 132–135. doi: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248870>
26. An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers / Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T. // *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2018. P. 308–313. doi: <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336209>
27. Dual Reversible Transformer Model for the Calculation of Low-Frequency Transients / Jazebi S., de Leon F., Farazmand A., Deswal D. // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013. Vol. 28, Issue 4. P. 2509–2517. doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2268857>
28. Tang Q., Guo S., Wang Z. Magnetic flux distribution in power transformer core with mitred joints // *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 117, Issue 17. P. 17D522. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4919119>

29. Cundeva S. A transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis // Serbian Journal of Electrical Engineering. 2008. Vol. 5, Issue 1. P. 21–30. doi: <https://doi.org/10.2298/sjee0801021c>
30. Rashtchi V., Rahimpour E., Fotoohabadi H. Parameter identification of transformer detailed model based on chaos optimisation algorithm // IET Electric Power Applications. 2011. Vol. 5, Issue 2. P. 238. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2010.0147>
31. Пайков И. А., Тихонов А. И. Анализ моделей для электромагнитного расчета силовых трансформаторов // Вестник ИГЭУ. 2015. № 3. С. 38–43. doi: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.3.038-043>
32. Остренко М. В., Тиховод С. М. Расчет потерь в элементах конструкции силовых трансформаторов и реакторов методом конечных элементов с граничными условиями импедансного типа // Электротехника и электроэнергетика. 2016. № 2. С. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-4>
33. Analysis of inrush currents of the unloaded transformer using the circuit-field modelling methods / Yarymbash D., Yarymbash S., Kotsur M., Divchuk T. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 3, Issue 5 (93). P. 6–11. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.134248>
34. Аветисян Д. А., Соколов В. С., Хан В. Х. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. М.: Энергия, 1976. 215 с.